

ZALEŻNOŚĆ POMIĘDZY SKŁADEM CHEMICZNYM ŻELIWA STOPOWEGO NA WALCE BIMETALOWE, A TEMPERATURĄ KRYSTALIZACJI T_L I T_S

F. BINCZYK¹, J. SITKO²

¹Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów, Politechnika Śląska,
 ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, POLSKA

²Katedra Zarządzania Jakością Procesów i Produktów, Politechnika Śląska,
 ul. Roosevelta 26, 41-800 Zabrze, POLSKA

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki oceny istotności wpływu składników żeliwa stopowego przeznaczonego na walce bimetalowe, a zawartością temperatury krystalizacji T_L i T_S . Metodą analizy regresji wielokrotnej wykazano istotny wpływ C, Si i Ni na obniżenie wartości temperatury krystalizacji T_L oraz istotny wpływ C, Mn i Ni na obniżenie oraz Cr i Mo na podwyższenie wartości temperatury T_S .

Key words: regression, significance level, temperature crystallisation, thermal analysis

1. WSTĘP

Walce bimetalowe typu „poler” produkowane są w Hucie Buczek S.A. technologią „przelewania” [1, 2]. W pierwszej kolejności do formy odlewane jest żeliwo stopowe, tworzące twardą warstwę zewnętrzną, a następnie żeliwo szare, które wypiera żeliwo stopowe i tworzy rdzeń walca o pośrednim składzie chemicznym. Stwierdzono, że twarda warstwa zewnętrzna wykazuje zróżnicowaną grubość i twardość na wysokości beczki walca. Jednym z etapów na drodze do wyjaśnienia tego zjawiska było wyznaczenie zależności empirycznych pomiędzy składem chemicznym żeliwa stopowego, a temperaturą krystalizacji T_L i T_S [3, 4]. Zależność taka w kolejnym etapie badań pozwoli na wyznaczenie parametrów krystalizacji warstwy żeliwa stopowego, warstwy prze-

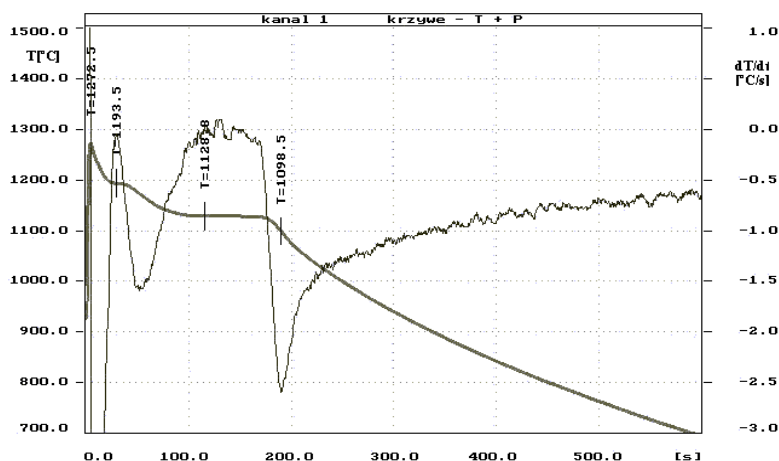
¹ dr hab. inż. – prof. Pol. Śl.

² mgr inż. – asystent.

ściowej i rdzenia walca w oparciu o znajomość składu chemicznego na przekroju poprzecznym walca.

2. PRZEPROWADZENIE BADAŃ I OBLICZEŃ

Wartości temperatury krystalizacji T_L (temperatury początku krystalizacji dendrytów austenitu) i T_S (temperatury krystalizacji eutektyki) wyznaczono metodą analizy termicznej i derywacyjnej ATD. Krzywe analizy termicznej rejestrowano w poszczególnych etapach wytapiania żeliwa, odlewając żeliwo do standardowego próbnika QC4010 z termoelementem typu K w osłonie kwarcowej. Sygnały z termoelementu odczytywano w rejestratorze MC-201, a następnie poddawano analizie programem komputerowym Analtda [5]. Przykładowy wykres analizy termicznej żeliwa stopowego na walec nr 13119 przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Wykres analizy termicznej żeliwa stopowego na walec nr 13119.
Fig. 1. Diagram analysis thermal cast iron alloy sleeved roll No. 13119.

Odczytane z wykresów ATD wartości temperatury krystalizacji T_L i T_S przedstawiono w tabeli 1. Następnie przy pomocy analizy regresji wielorakiej dokonano oceny wpływu składników żeliwa na temperatury T_L i T_S , przyjmując poziom istotności $\alpha=0,05$ [5, 6]. Analizy dokonano w ten sposób, że w kolejnym kroku odrzucono parametr najmniej istotnie wpływający na badaną cechę wynikową. Ostatecznie uzyskano zależność, w której występują tylko parametry istotnie wpływające na analizowaną cechę. Kolejne etapy postępowania dla statystycznej oceny wpływu składników na wartość określonej temperatury przedstawiono dla temperatury T_L . Kolor szary oznacza istotny wpływ składnika.

ARCHIWUM ODLEWNICTWA

Tabela 1. Wyniki analizy składu chemicznego [%] oraz temperatury krystalizacji [°C] T_L i T_S żeliwa szarego i stopowego.

Table 1. Results of chemical composition [%] and as well as temperature of crystallization [°C] T_L and T_S gray and alloy cast iron.

Nr walca	Symbol	T _L	T _S	C	Mn	Si	P	Cr	Ni	Mo	Cu
13119 13120	polr2	1274	1131	2,97	0,59	0,89	0,08	0,24	1,29	0,41	0,14
	polr3	1253	1128	3,00	0,60	1,73	0,08	0,25	1,29	0,40	0,14
	polr4	1250	1126	3,00	0,60	1,73	0,08	0,25	1,28	0,40	0,14
	polrk1	1241	1120	3,00	0,60	1,73	0,08	0,25	1,29	0,40	0,14
	polb1	1216	1128	3,38	1,12	1,23	0,08	1,76	4,24	0,61	0,16
	polb3	1205	1127	3,43	1,14	1,23	0,08	1,84	4,43	0,61	0,16
	polbk1	1194	1129	3,49	1,14	1,23	0,08	1,84	4,45	0,61	0,16
13138 13141	Polbk2	1191	1127	3,50	1,12	1,20	0,07	1,80	4,42	0,61	0,16
	Polrk2	1255	1132	3,00	0,59	1,68	0,08	0,33	1,28	0,38	0,10
13205 13206	Polrk3	1258	1130	2,97	0,59	1,72	0,07	0,17	1,42	0,47	0,30
	Polbk3	1189	1124	3,50	1,16	1,20	0,07	1,84	4,49	0,63	0,13
13216 13217	Polbk4	1195	1125	3,48	1,11	1,20	0,08	1,85	4,48	0,65	0,18
	Polrk4	1249	1128	3,00	0,60	1,82	0,07	0,40	1,39	0,40	0,17
13261	Polbk5	1199	1126	3,44	1,15	1,18	0,09	1,83	4,44	0,61	0,17
	Polrk5	1253	1129	2,99	0,60	1,70	0,06	0,25	1,30	0,40	0,19
13269 13270	Polbk6	1187	1123	3,55	1,11	1,15	0,09	1,85	4,50	0,61	0,15
	Polrk6	1241	1132	3,00	0,58	1,70	0,07	0,25	1,47	0,40	0,15
13314 13315	polb4	1200	1127	3,47	1,10	1,18	0,09	1,71	4,34	0,62	0,15
	polr5	1263	1132	2,97	0,59	1,66	0,08	0,25	1,30	0,41	0,26
	polb5	1189	1122	3,51	1,15	1,12	0,09	1,80	4,40	0,62	0,15
	polr6	1255	1130	3,0	0,6	1,72	0,08	0,25	1,30	0,41	0,26
13369	polb6	1210	1127	3,50	0,80	1,22	0,09	1,08	2,88	0,58	0,18
	polr7	1274	1135	2,98	0,59	0,90	0,08	0,21	1,28	0,48	0,29
	polr8	1270	1131	2,98	0,59	0,92	0,08	0,21	1,34	0,48	0,29
	polb7	1195	1122	3,53	1,12	1,19	0,09	1,75	4,30	0,60	0,18
	polb8	1192	1121	3,51	1,15	1,20	0,09	1,84	4,44	0,61	0,17
	polr9	1252	1130	3,00	0,60	1,74	0,08	0,15	1,31	0,47	0,29

Krok 1

Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: TL
 $R=0,99351720$ $R^2=0,98707643$ Popraw. $R^2=0,98126082$
 $F(9,20)=169,73$ $p<,00000$ Błąd std. estymacji: 4,0845

	BETA	Błąd st. BETA	B	Błąd st. B	t(20)	poziom p
W. wolny			1652,4255	58,03945779	28,47073	0,0000
C	-0,95622	0,156477	-122,2551	20,00601441	-6,11092	0,0000
MN	-0,49786	0,297285	-55,4070	33,08472285	-1,6747	0,1096
SI	-0,18575	0,046924	-16,9739	4,287774667	-3,95867	0,0008
P	0,063902	0,042444	228,6422	151,8638914	1,505573	0,1478
S	-0,01292	0,064733	-120,4847	603,8854341	-0,19952	0,8439
CR	0,697054	0,417389	28,3943	17,00221279	1,670035	0,1105
NI	-0,47903	0,242795	-10,3530	5,247402498	-1,97298	0,0625
MO	0,144009	0,179703	46,7455	58,33189061	0,801372	0,4323
CU	0,015883	0,053777	8,8755	30,05140929	0,295344	0,7708

Krok 2 – po wyeliminowaniu oddziaływania S:

Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: TL
 $R=0,99350425$ $R^2=0,98705070$ Popraw. $R^2=0,98211764$
 $F(8,21)=200,09$ $p<,00000$ Błąd std. estymacji: 3,9900

	BETA	Błąd st. BETA	B	Błąd st. B	t(21)	poziom p
W. wolny			1654,4840	55,79403085	29,65342	0,0000
C	-0,9665	0,144328	-123,5699	18,45275543	-6,69655	0,0000
MN	-0,51169	0,282403	-56,9463	31,42845822	-1,81193	0,0843
SI	-0,18647	0,045704	-17,0393	4,176357174	-4,07993	0,0005
P	0,059454	0,035283	212,7285	126,2423438	1,685081	0,1068
CR	0,694735	0,407577	28,2998	16,60252636	1,70455	0,1030
NI	-0,46753	0,230394	-10,1044	4,97938888	-2,02925	0,0553
MO	0,153008	0,169927	49,6668	55,15845932	0,900438	0,3781
CU	0,01848	0,050971	10,3267	28,48342253	0,362553	0,7206

Krok 3 – po wyeliminowaniu oddziaływania Cu:

Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: TL
 $R=0,99346346$ $R^2=0,98696965$ Popraw. $R^2=0,98282363$
 $F(7,22)=238,05$ $p<,00000$ Błąd std. estymacji: 3,9105

	BETA	Błąd st. BETA	B	Błąd st. B	t(22)	poziom p
W. wolny			1652,6837	54,4645812	30,34419	0,0000
C	-0,97916	0,137249	-125,1883	17,54767158	-7,13418	0,0000
MN	-0,47846	0,261785	-53,2476	29,13388357	-1,82769	0,0812
SI	-0,1803	0,041576	-16,4758	3,799128124	-4,33673	0,0003
P	0,061569	0,034103	220,2959	122,022424	1,805372	0,0847
CR	0,663749	0,390569	27,0376	15,90972311	1,69944	0,1033
NI	-0,50761	0,1981	-10,9708	4,281435332	-2,5624	0,0178
MO	0,201452	0,102888	65,3918	33,39758542	1,957979	0,0630

Krok 4 - po wyeliminowaniu wpływu Cr:

Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: TL
 R=0,99260217 R²=0,98525906 Popraw. R²=0,98141360
 F(6,23)=256,21 p<,00000 Błąd std. estymacji: 4,0678

	Błąd st.			Błąd st.			
	BETA	BETA	B	B	t(23)	poziom p	
W. wolny			1588,5642		40,85965718	38,87855	0,0000
C	-0,8464	0,117389	-108,2146		15,00844687	-7,21025	0,0000
MN	-0,05725	0,087651	-6,3711		9,754618075	-0,65314	0,5201
SI	-0,19444	0,042374	-17,7676		3,87207379	-4,58866	0,0001
P	0,051943	0,034983	185,8518		125,1689038	1,484808	0,1512
NI	-0,31866	0,170553	-6,8870		3,686072346	-1,8684	0,0745
MO	0,138124	0,099761	44,8352		32,38266209	1,384543	0,1795

Krok 5 – po wyeliminowaniu oddziaływania Mn:

Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: TL
 R=0,99246444 R²=0,98498566 Popraw. R²=0,98185767
 F(5,24)=314,89 p<,00000 Błąd std. estymacji: 4,0189

	Błąd st.			Błąd st.			
	BETA	BETA	B	B	t(24)	poziom p	
W. wolny			1574,3131		34,13074815	46,12595	0,0000
C	-0,81773	0,107563	-104,5489		13,75222502	-7,60233	0,0000
SI	-0,18088	0,036495	-16,5285		3,334834135	-4,95631	0,0000
P	0,044249	0,032544	158,3243		116,4432261	1,359669	0,1866
NI	-0,40509	0,106297	-8,7551		2,297344141	-3,81095	0,0008
MO	0,155514	0,094987	50,4800		30,83296243	1,63721	0,1146

Krok 6 – po wyeliminowaniu oddziaływania P:

Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: TL
 R=0,99188160 R²=0,98382912 Popraw. R²=0,98124178
 F(4,25)=380,25 p<,00000 Błąd std. estymacji: 4,0866

	Błąd st.			Błąd st.			
	BETA	BETA	B	B	t(25)	poziom p	
W. wolny			1580,1418		34,43041177	45,89378	0,0000
C	-0,78201	0,106062	-99,9825		13,5603079	-7,37317	0,0000
SI	-0,20763	0,031253	-18,9733		2,855841675	-6,64366	0,0000
NI	-0,40862	0,108054	-8,8313		2,335318078	-3,78163	0,0009
MO	0,128853	0,094506	41,8258		30,67665097	1,36344	0,1849

Krok 7 – po wyeliminowaniu oddziaływania Mo:

Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: TL
 R=0,99127527 R²=0,98262667 Popraw. R²=0,98062206
 F(3,26)=490,18 p<,00000 Błąd std. estymacji: 4,1535

	Błąd st.			Błąd st.			
	BETA	BETA	B	B	t(26)	poziom p	
W. wolny			1576,2349		34,87312728	45,19913	0,0000
C	-0,7234	0,098547	-92,4885		12,59954795	-7,34062	0,0000
SI	-0,22454	0,029159	-20,5178		2,664511308	-7,70039	0,0000
NI	-0,35033	0,100863	-7,5715		2,179900772	-3,47334	0,0018

W przypadku temperatury T_S przedstawiono ostateczny wynik statystycznej oceny wpływu składników na jej wartość.

Krok ostatni:

Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: TS						
R=0,87628689 R2=0,76787871 Popraw. R^2=0,71952011						
F(5,24)=15,879 p<,00000 Błąd std. estymacji: 1,7887						
	BETA	Błąd st. BETA	B	Błąd st. B	t(24)	poziom p
W. wolny			1213,6916	24,32825453	49,88815	0,0000
C	-1,818	0,513269	-26,3103	7,428097722	-3,542	0,0017
MN	-2,94174	1,019087	-37,0580	12,83773078	-2,88664	0,0081
CR	4,171218	1,536415	19,2331	7,084278711	2,714904	0,0121
NI	-1,45987	0,703868	-3,5714	1,721940316	-2,07407	0,0490
MO	1,125689	0,353042	41,3610	12,9717803	3,18854	0,0039

Analiza regresji zmiennych zależnych T_L i T_S zawiera pewne elementy dodatkowe, które należy przeanalizować.

Błąd standardowy estymacji (**Se**) informuje o stopniu dopasowania modelu do danych empirycznych. Im mniejsza jest wartość **Se**, tym lepiej dopasowany jest model. Tak więc przewidywane przez oszacowane równanie wartości zmiennych zależnych, różnią się od wartości empirycznej średnio biorąc o:

- dla $T_L \pm 4,15^\circ\text{C}$,
- dla $T_S \pm 1,79^\circ\text{C}$.

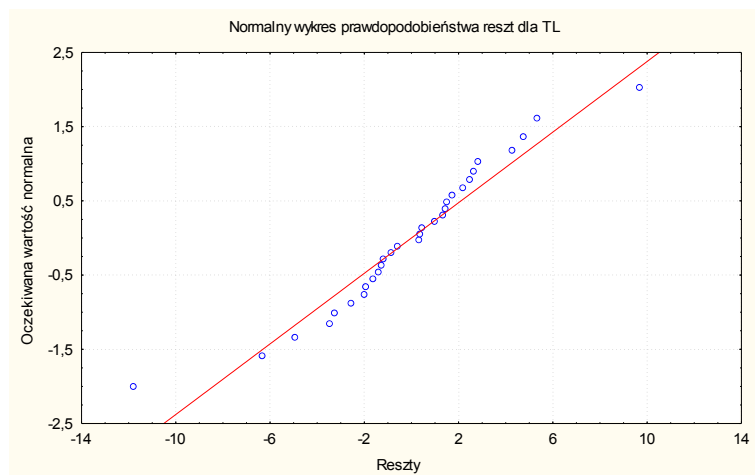
Ostateczne zależności empiryczne są następujące:

$$T_L = 1576,23 - 92,49 \cdot C - 20,52 \cdot Si - 7,5 \cdot Ni (\pm 4,15) [^\circ\text{C}]$$

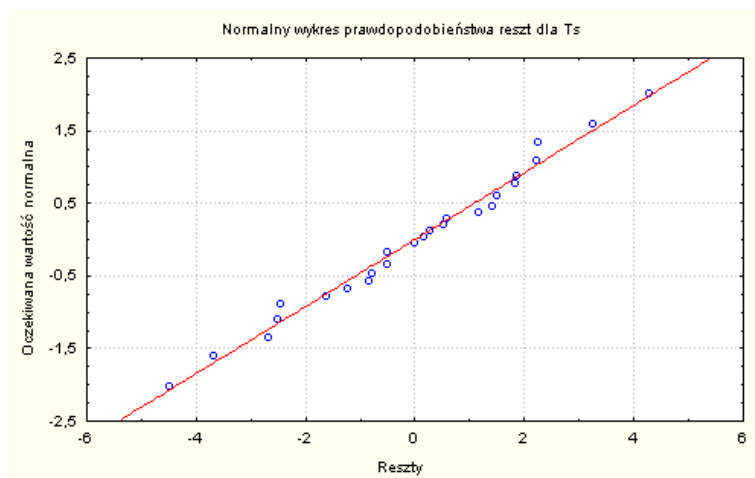
$$T_S = 1213,7 - 26,31 \cdot C - 37,06 \cdot Mn + 19,23 \cdot Cr - 3,57 \cdot Ni + 41,36 \cdot Mo (\pm 1,79) [^\circ\text{C}]$$

W ostatecznej ocenie analizy regresji wielokrotnej wymagane jest sprawdzenie rozkładu tzw. reszt. Rozkład ten powinien być zbliżony do normalnego. W tym celu opracowano odpowiednie zależności reszty w stosunku do oczekiwanej wartości normalnej (dla T_L -rys. 2, dla T_S -rys. 3).

Jeżeli punkty pomiarowe układają się wzdłuż ciągłej linii rozkładu normalnego, to można uznać, że rozkład reszt jest również zgodny z rozkładem normalnym. Im punkty pomiarowe bardziej odbiegają od tej linii, tym rozkład reszt odbiega od wartości normalnej. Jak wynika z rysunków 2 i 3 uzyskane rozkłady reszt w niewielkim stopniu odbiegają od linii, dlatego też można stwierdzić, że opracowane zależności są poprawne ze statystycznego punktu widzenia.



Rys. 2. Wykres normalny prawdopodobieństwa reszt dla T_L .
 Fig. 2. Normal graph of probability of the rests for T_L .



Rys. 3. Wykres normalny prawdopodobieństwa reszt dla T_S .
 Fig. 3. Normal graph of probability of the rests for T_S .

3. PODSUMOWANIE

Opracowane zależności empiryczne są słuszne dla żeliwa stopowego o składzie chemicznym w następującym zakresie zawartości składników: C – 2,97 do 3,55%, Mn – 0,59 do 1,16%, Si – 0,89 do 1,82%, P – 0,06 do 0,09%, S – 0,017 do 0,025%, Cr – 0,15 do 1,85%, Ni – 1,28 do 4,50%, Mo – 0,38 do 0,65% oraz Cu – 0,10 do 0,29%.

Zależności te zostały wykorzystane do wyznaczenia wartości temperatury krystalizacji T_L i T_S w obszarze przekroju poprzecznego walca, różniących się w sposób istotny twardością i składem chemicznym. Wyniki tych badań zostaną przedstawione w następnych opracowaniach.

LITERATURA

- [1] Raczyński B., Wachelko T.: *Walce żeliwne*, wyd. Śląsk, 1976.
- [2] Instrukcja technologiczna „Produkcja walców żeliwnych dwuwarstwowych zespolonych o nieokreślonej warstwie utwardzenia”, Huta Buczek S.A. 2000.
- [3] Binczyk F., Sitko J., Czerwiński E., Krzemień E.: *Krystalizacji żeliwa szarego i stopowego na walce dwuwarstwowe*, Arch.Odlewnictwa, nr1, PAN K-ce 2001.
- [4] Binczyk F., Sitko J.: *Analysis of technological factors forming geometry of hard layer of the sleeved rolls*, Acta Metallurgica Slovaca, 2002.
- [5] Podolski P.: *Program komputerowy Analdta do analizy krzywych krzepnięcia stopów*, Pol. Śl., Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów, K-ce 1996.
- [6] Maliński M., Szymzal J.: *Współczesna statystyka matematyczna w medycynie*, Śląska Akademia Medyczna, Katowice 1999.
- [7] Greń J.: *Statystyka matematyczna. Modele i zadania*, PWN, Warszawa 1982.

AN EMPIRICAL RELATION, BETWEEN CHEMICAL COMPOSITION OF ALLOY CAST IRON AND TEMPERATURE OF CRYSTALLIZATION T_L - T_S

SUMMARY

In this work the results of research of the chemical composition of alloy cast iron on the temperature of crystallization T_L and T_S have been presented. Using of multiple regression analysis essential influence of C, Si and Ni contents in alloy on the decreasing of temperature crystallization T_L . Contents of C, Mn and Ni influence on the decreasing of T_S temperature.

Recenzował: prof. dr hab.inż. Stanisław Pietrowski